

电容式传感器

引言

电容式传感器属于结构型的传感器,要接电桥,适合动态测量(不可以静态测量)。电容器是电子技术的三大类无源元件(电阻、电感和电容)之一。利用电容器的原理,将非电量转换成电量,进而实现非电量到电量的转化的器件或装置,称为电容式传感器。电容式传感器广泛用于压力、位移、厚度、加速度、液位、物位、湿度和成分含量等方面的测量。

导航——教与学

理论	重点	电容式传感器的原理和特点
	难点	电容式传感器的组成和原理
	教学规划	变极距型、变面积型、变电介质型电容式传感器的结构、工作原理、基本特性、等效电路、测量电路及应用
	建议学时	2 学时
操作	实验	电容式传感器位移特性(有条件选做)
	建议学时	2 学时(结合线上配套素材)

3.1 电容式传感器的基本结构和种类

在物理学中,两个彼此绝缘而又靠得很近的导体就组成了一个电容器,电容量等于极板所带电荷量与极板间的电压之比。平行金属板间的电容量为

$$C = \frac{\epsilon S}{d} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S}{d} \quad (3-1)$$

式中, C 为电容, μF ; ϵ 为极板间介质的介电常数,空气的 $\epsilon=1$; S 为两个极板相互覆盖的面积, cm^2 ; d 为两个极板间的距离, cm ; ϵ_r 为相对介电

常数; ϵ_0 为真空介电常数, $\epsilon_0 = 0.088\,542 \times 10^{-12} \text{ F/cm}$ 。

如图 3-1 所示, 电容传感器的三个参数 d 、 S 、 ϵ 中任一发生变化都会引起电容量的变化。平板电容式传感器可分为变极距型电容传感器、变面积型电容传感器、变介质型电容传感器三类。

变极距型电容传感器的优点是可进行动态非接触式测量, 对被测系统的影响小, 灵敏度高, 适用于较小位移的测量, 但这种传感器有非线性特性, 因此使用范围受到一定限制。变极距型电容传感器一般用来测量微小的线位移或由于力、压力、振动等引起的极距变化(见电容式压力传感器)。变面积型电容传感器的优点是输出与输入呈线性关系, 但与变极距型电容传感器相比, 灵敏度较低, 适用于较大的直线或角位移的测量。变介质型电容传感器则多用于测量液体的高度、物位测量和各种介质的温度、密度、湿度的测定。

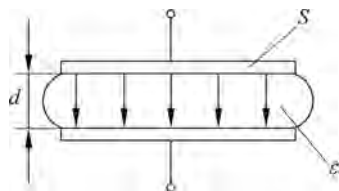


图 3-1 电容传感器的结构

3.1.1 变极距型电容传感器

1. 变极距型电容传感器的特点

变极距型电容传感器可实现动态非接触测量, 动态响应特性好, 灵敏度和精度极高(可达 nm 级), 适用于较小位移($0.001 \sim 1 \mu\text{m}$)的精度测量。但传感器存在原理上的非线性误差, 受线路杂散电容(如电缆电容、分布电容等)的影响显著, 为改善这些问题需配合使用的电子电路比较复杂, 极距变化型电容传感器的灵敏度与极距的平方呈正比, 极距越小灵敏度越高。但极距过小, 容易引起电容器击穿或短路。为此, 极板间可采用高介电常数的材料(云母、塑料膜等)作介质。原理上的非线性要进行修正。如图 3-2 所示, 只有在 $\Delta d/d_0$ 很小时, 才有近似的线性输出。

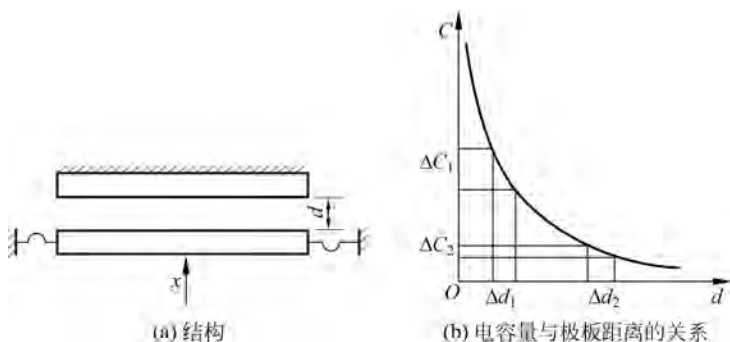


图 3-2 变极距型电容传感器

2. 变极距型电容传感器的应用

一般变极距型电容传感器的起始电容在 $20 \sim 100 \text{ pF}$, 极板间距离在 $25 \sim 200 \mu\text{m}$ 的范围内, 最大位移应小于间距的 $1/10$, 故在微位移测量中应用最广。

电容式传声器是变极距型电容传感器最典型的应用。电容式传声器是目前各项指标都较好的一种传声器,具有频率特性好、音质清脆、构造坚固、体积小巧等优点。它被广泛应用于广播电台、电视台、电影制片厂等场合。

电容式传声器是一种依靠电容量变化而起到换能作用的传声器,也是目前运用最广、性能较好的传声器之一。电容式传声器主要由极头、前置放大器、极化电源和电缆等部分组成。电容式传声器的极头实际是一只电容器,如图 3-3 所示,它的两个电极一个固定,另一个可动,通常两电极相隔很近(一般只有几十微米)。可动电极是一片极薄的振膜($25\sim 30\mu\text{m}$)。固定电极是一片具有一定厚度的极板,板上开孔或槽,控制孔或槽的开口大小以及极板与振膜的间距,可以改变共振时的阻尼而获得均匀的频率响应。振膜一般采用金属化的塑料膜或金属膜。

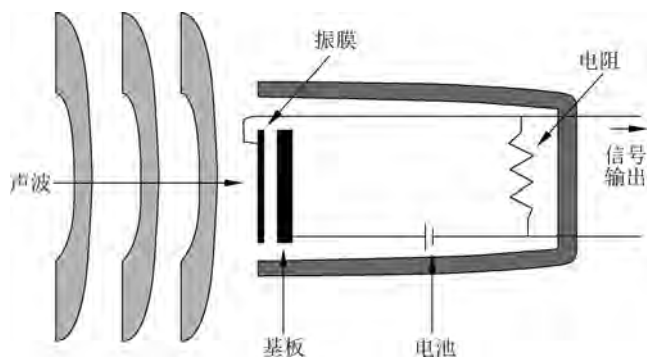


图 3-3 电容式传声器原理

3. 差动式变极距电容传感器

在使用电容式传感器时,为提高传感器的灵敏度,克服外界因素(如电源电压、环境温度等)对测量的影响,经常把电容式传感器制成差动式结构。差动式变极距型电容传感器如图 3-4 所示,它可以提高灵敏度、减小非线性。当动极板移动后,两个电容值呈差动变化,即其中一个电容值增大,另一个电容值减小,这样可以消除外界因素造成的测量误差。

4. 差动式变极距型电容传感器的应用

(1) 电容式加速度传感器

图 3-5 所示为电容式加速度传感器的结构,它有两个固定极板(与壳体绝缘),中间有一个用弹簧片做支撑的质量块,此质量块的两个端面经过磨平抛光后作为可动极板(与壳体电连接)。当传感器壳体随被测对象在垂直方向做直线加速运动时,质量块在惯性空间中相对静止,而两个固定电极将相对质量块在垂直方向产生大小正比于被测加速度的位移。此位移使两个电容的间隙发生变化,一个增加,一个减小,从而使 C_1 、 C_2 产生大小相等、符号相反的增量,此增量与被测加速度成正比。

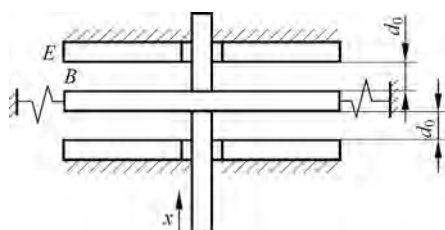


图 3-4 差动式变极距型电容传感器

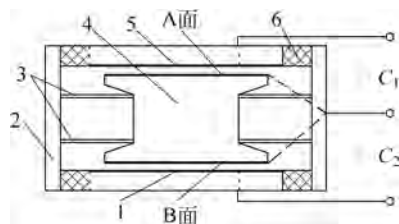


图 3-5 电容式加速度传感器的结构

1、5—固定极板；2—壳体；3—弹簧片；
4—质量块；6—绝缘体

电容式加速度传感器的主要特点是频率响应快、量程范围大，大多采用空气或其他气体作阻尼物质。差动式变极距型电容传感器作为加速度传感器使用时精度较高，频率响应范围宽，量程大，可以测很高的加速度。

电容式加速度传感器安装在轿车上，可以作为碰撞传感器，如图 3-6 所示。当测得的负加速度值超过设定值时，微处理器据此判断发生了碰撞，于是启动轿车前部的折叠式安全气囊迅速充气而膨胀，托住驾驶员及前排乘员的胸部和头部。



图 3-6 电容式加速度传感器用作碰撞传感器

随着 MEMS 技术的迅猛发展，各种基于 MEMS 技术的传感器应运而生，由于国防和尖端技术的需要，微加速度传感器近年发展迅速。在各种微加速度传感器中，微电容式加速度传感器具有结构简单，灵敏度高，动态特性好，抗过载能力强，体积小、质量轻，易于与测试、控制电路集成，有利于大规模批量生产等优点，其研究和应用受到越来越广泛的关注。

电容式加速度传感器采用了 MEMS 技术，通常称为微机电系统，在安全气囊、手机移动设备等领域具备不可动摇的地位。图 3-7 所示为硅微加工加速度传感器原理。加速度传感器以微细加工技术为基础，既能测量交变加速度（振动），也可测量惯性力或重力加速度。

MEMS 技术是多学科交叉的新兴领域，涉及精密机械、微电子材料科学、微细加工、系统与控制等技术学科和物理学、化学、力学、生物学等基础学科，包含微传感器、微执行器及信号处理、控制电路等。MEMS 技术可利用三维加工技术制造微米或纳米尺度的零件、部件，完成一定功能的复杂微细系统，是实现“片上系统”的发展方向。

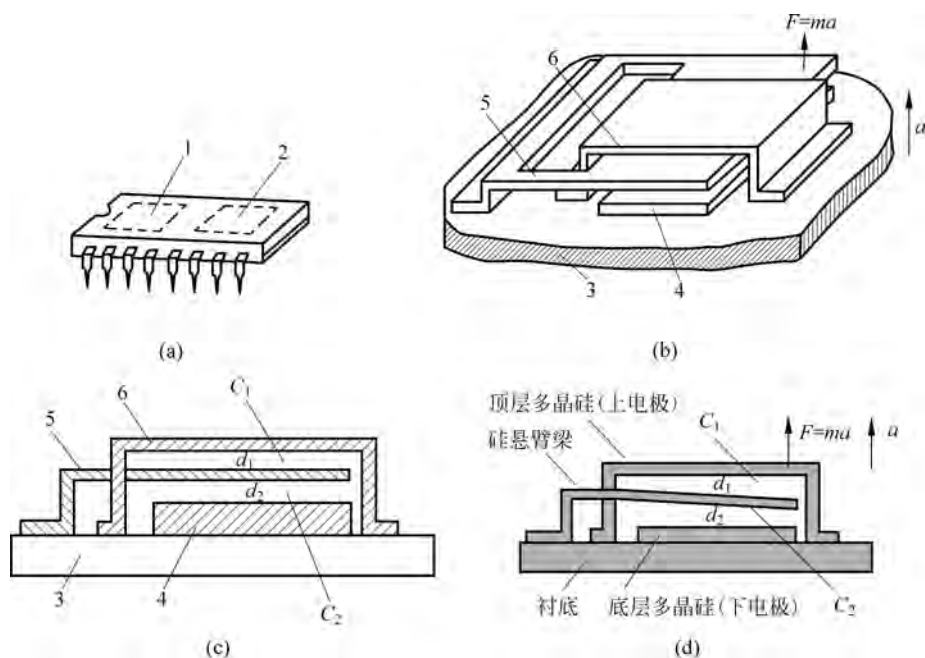


图 3-7 硅微加工加速度传感器原理

1—加速度测试单元；2—信号处理电路；3—衬底；4—底层多晶硅(下电极)；
5—多晶硅悬臂梁；6—顶层多晶硅(上电极)

利用微电子加工技术,可以将一块多晶硅加工成多层结构。在硅衬底上安装三个多晶硅电极,组成差动电容 C_1 、 C_2 。底层多晶硅和顶层多晶硅固定,中间层多晶硅是一个可以上、下微动的振动片。因为其左端固定在衬底上,所以相当于悬臂梁。

当中间层多晶硅感受到上、下振动时, C_1 、 C_2 呈差动变化,与加速度测试单元封装在同一壳体中的信号处理电路将 ΔC 转换成直流输出电压。因为它的激励源也在同一壳体内,所以集成度很高。由于硅的弹性滞后很小,且悬臂梁的质量很轻,因此频率响应可达 1kHz,加速度范围可超过 10g。

如果在壳体内部的三个相互垂直方向安装三个加速度传感器,就可以测量三维方向的振动或加速度。三轴加速度传感器在手机、无人机中均有使用。

(2) 电容式差压传感器

图 3-8 所示为一个膜片动电极和两个在凹形玻璃上电镀成的固定电极组成的差动电容器。当被测压力或压力差作用于膜片并使其产生位移时,形成的两个电容器的电容量一个增大,一个减小。该电容值的变化经测量电路转换为与压力或压力差相对应的电流或电压的变化。

图 3-8 中金属膜片为动电极,两个在凹形玻璃上的金属镀层为固定电极,构成差动电容器。这种传感器分辨率很高,常用于气、液的压力或压差及液位和流量的测量。

电容式差压传感器结构简单、灵敏度高、线性好、响应速度快(约 100ms),可以测量微

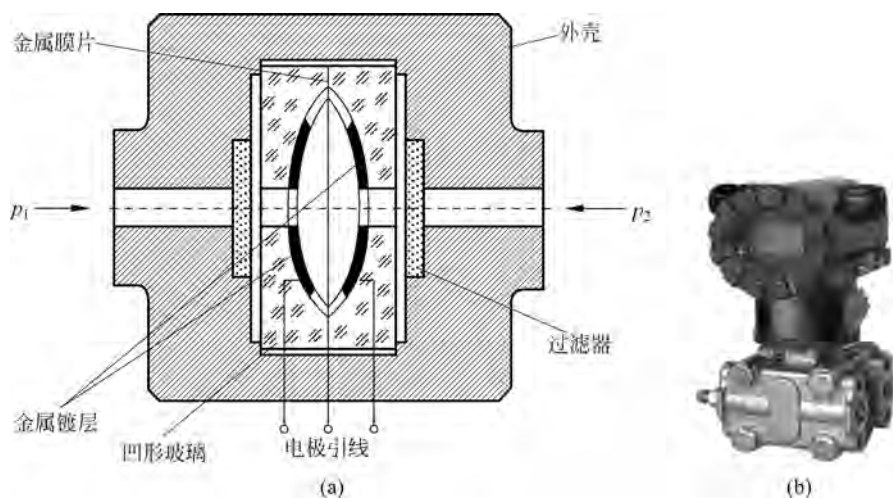


图 3-8 电容式差压传感器的结构

小压差($0 \sim 0.75 \text{ Pa}$)。测量时需要把膜片的一侧密封并抽成高真空(10^{-5} Pa)，可以减少由于介电常数受温度影响引起的温度不稳定性。

3.1.2 变面积型电容传感器

变面积型电容传感器的结构形式有平板式变面积型电容传感器、圆筒面式变面积型电容传感器、扇形平板式变面积型电容传感器等，如图 3-9 所示。其中，平板式变面积型电容传感器和圆筒面式变面积型电容传感器用以测量直线位移，扇形平板式变面积型电容传感器用以测量角位移。由于电容量与面积变化成正比，因此，变面积型电容传感器的特性为线性特性，测量范围广，但灵敏度较低。

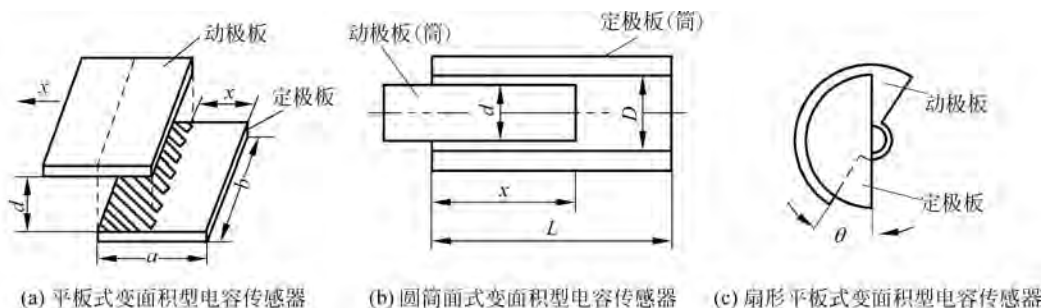


图 3-9 变面积型电容传感器

变面积型电容传感器在工作时，极距、介质等保持不变，被测量的变化使其有效作用面积发生改变。在变面积型电容传感器的两个极板中，一个是固定不动的，称为定极板；另一个是可移动的，称为动极板。

变面积型电容传感器，常用于收音机调台，如图 3-10 所示。



图 3-10 变面积型电容传感器的应用

3.1.3 变介质型电容传感器

变介质型电容传感器的极距、有效作用面积不变,被测量的变化使极板之间的介质情况发生变化。它主要用来测量两极板之间的介质的某些参数的变化,如测量两极板间介质的厚度、位移、液位、液量,还可以测量温度、湿度、容量等,如图 3-11 所示。

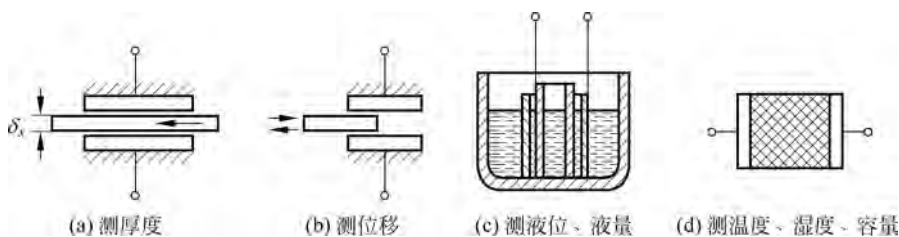


图 3-11 变介质型电容传感器的应用

电容式液位传感器是利用被测介质的变化引起电容变化的原理进行测量的一种变介式电容传感器。图 3-12 是电容式液位传感器的原理图。

传感器的静电电容可表示为

$$C = \frac{K(\epsilon_s - \epsilon_0)h}{\ln(D/d)} \quad (3-2)$$

式中, K 为比例常数; ϵ_s 为被测物料的相对介电常数; ϵ_0 为空气的相对介电常数; D 为储罐的内径; d 为电极直径; h 为被测物料的高度。

在式(3-2)中, K 是系数,当 d 接近 D 时,可略去边缘效应,取 $K = 0.55$ 。可见,传感器的电容增量与被测物料高度 h 呈正比。故电容式传感器常用来测量液位和料位的高度。传感器的灵敏度为常数,电容 C 理论上与液面 h 呈线性关系,只要测出传感器电容 C 的大小,就可得到液位 h 。

假定罐内没有物料时的传感器静电电容为 C_0 ,放入物料后传感器静电电容为 C_1 ,则两者电容差为

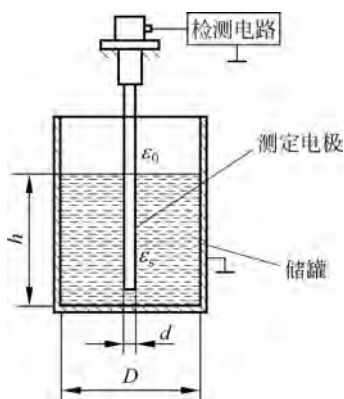


图 3-12 电容式液位传感器原理图

$$\Delta C = C_1 - C_0 \quad (3-3)$$

由式(3-2)和式(3-3)可见,两种介电常数差别越大, D 和 d 相差越小,传感器灵敏度就越高。

变介质型电容传感器有较多的结构形式,可以用来测量纸张、绝缘薄膜等的厚度,也可以用来测量粮食、纺织品、木材或煤等非导电固体介质的湿度。

3.2 电容式传感器的应用

电容式传感器具有结构简单、耐高温、耐辐射、分辨率高、动态响应特性好等优点,广泛应用于压力、位移、加速度、厚度、振动、液位等测量中。在使用过程中要注意以下几个方面:①减小环境温度、湿度变化(可能引起某些介质的介电常数或极板的几何尺寸、相对位置发生变化);②减小边缘效应;③减少寄生电容;④使用屏蔽电极并接地(对敏感电极的电场起保护作用,与外电场隔离);⑤注意漏电阻、激励频率和极板支架材料的绝缘性。

3.2.1 电容式位移传感器

以电容器为敏感元件,将机械位移量转换为电容量的传感器称为电容式位移传感器。电容式位移传感器的位移测量范围为 $0.001\sim 10\text{mm}$,变极距式电容传感器的测量精度约为 2% ,变面积式和变介质式电容传感器的测量范围大、精度较高,其分辨率可达 $0.3\mu\text{m}$ 。电容式位移传感器常用于测量振幅、轴回转精度和轴心偏摆。

位移有直线位移和角位移之分。电容式位移传感器可以测量直线位移,也可以测量角位移。电容式位移传感器可用于测量振幅和偏摆等,如图3-13所示。

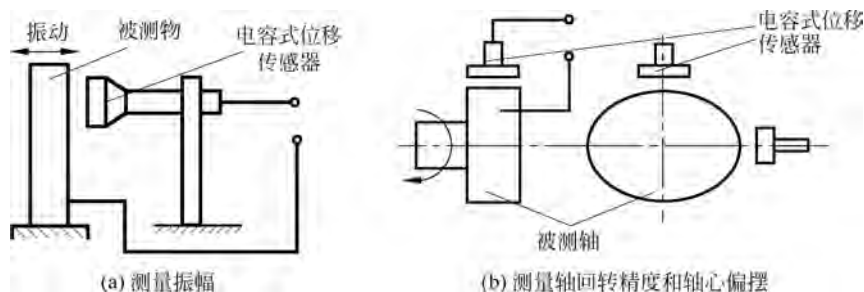


图 3-13 电容式位移传感器的应用

3.2.2 电容接近开关

电容接近开关与电容式位移传感器的不同之处在于输出开关量。

接近开关是一种无须与运动部件进行机械接触就可以进行检测的位置开关。当物体接近开关的感应面并达到动作距离时,接近开关不需要机械接触和施加任何压力即可动作,从而驱动执行机构或为采集装置提供信号。接近开关是一种开关型传感器(无触点开

关),它既有行程开关、微动开关的特性,同时又具有传感性能,且动作可靠,性能稳定,频率响应快,使用寿命长,抗干扰能力强,并具有防水、防振、耐腐蚀等优点。

接近开关又称无触点接近开关,是理想的电子开关量传感器。当被检测物体接近开关的感应区域时,开关就能无接触、无压力、无火花地迅速发出电气指令,并准确反映出运动机构的位置和行程。即使用于一般的行程控制,接近开关的定位精度、操作频率、使用寿命、安装调整的方便性及对恶劣环境的适应能力,都是一般机械式行程开关所不能相比的。接近开关可以非接触式精确测量位移和振动幅度,在最大量程为 $(100 \pm 5) \mu\text{m}$ 时,最小检测量可达 $0.01 \mu\text{m}$ 。

电容接近开关如图 3-14 所示,被检测物体可以是导电体、介质损耗较大的绝缘体、含水的物体或人;可以接地,也可以不接地。调节接近开关尾部的灵敏度调节电位器,可以根据被测物体的不同来改变动作距离。测量头通常是构成电容器的一个极板,而另一个极板是物体本身。

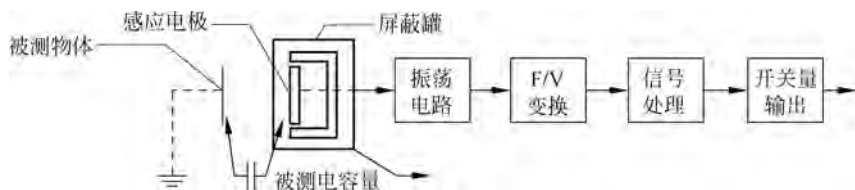


图 3-14 电容接近开关

工作过程一：检测极板设置在接近开关的最前端,测量转换电路安装在接近开关壳体内,用介质损耗很小的环氧树脂填充、灌封。当没有物体靠近检测极时,检测板与大地间的电容量 C 非常小,它与电感 L 构成高品质因数(Q)的 LC 振荡电路;当被检测物体为地电位的导电体(如与大地有很大分布电容的人体、液体等)时,检测极板对地电容 C 增大, LC 振荡电路的 Q 值下降,导致振荡器停振。

工作过程二：当不接地、绝缘被测物体接近检测极板时,由于检测极板上施加有高频电压,在它附近产生交变电场,所以被检测物体会受到静电感应,产生极化现象,正、负电荷分离,使检测极板的对地等效电容量增大, LC 振荡电路的 Q 值降低。对能量损耗较大的介质(如各种含水有机物),在高频交变极化过程中需要消耗一定的能量,该能量由 LC 振荡电路提供,必然会使 Q 值进一步降低,振荡减弱,振荡幅度减小。当被测物体靠近到一定距离时,振荡器的 Q 值低到无法维持振荡而停振。根据输出电压 U_o 的大小,可大致判定被测物体接近的程度。

一般情况下,当被检测物体为非金属材料时(如木材、纸张、塑料、玻璃和水等),可以选用电容式接近开关。

如图 3-15 所示,测量头构成电容器的一个极板,另一个极板是物体本身。当物体移向接近开关时,物体和接近开关的介电常数发生变化,使与测量头相连的电路状态也随之发生变化,由此便可控制开关的接通和关断。接近开关检测的物体,并不限于金属导体,也可以是绝缘的液体或粉状物体。

(1) 电容接近开关的应用——物位测量控制。如图 3-16 所示,测定电极安装在罐

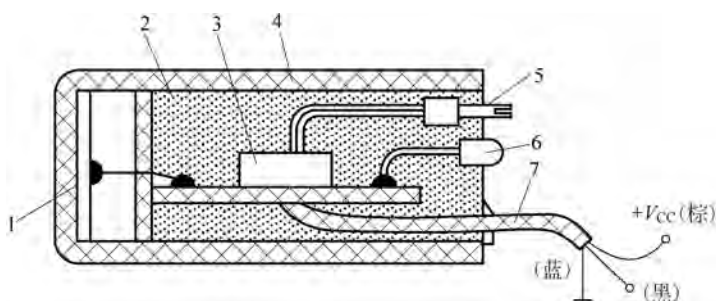


图 3-15 电容接近开关原理图

1—检测极板；2—填充树脂；3—测量转换电路；4—塑料外壳；
5—灵敏度调节电位器；6—工作指示灯；7—信号电缆

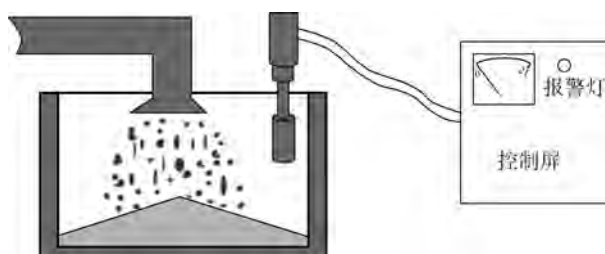


图 3-16 电容接近开关在物位测量控制中的使用演示

的顶部,这样在罐壁和测定电极之间就形成了一个电容器。当罐内放入被测物料时,由于被测物料介电常数的影响,传感器的电容量将发生变化,电容量变化的大小与被测物料在罐内的高度有关,且呈比例变化。检测出这种电容量的变化就可测定物料在罐内的高度。

(2) 电容接近开关的应用——行程限位。图 3-17 所示为电容接近开关用于行程限位及其实物图。要求对某个工件进行加工,工件用夹具固定在移动工作台上,工作台由一个主电动机拖动,做来回往复运动,刀具做旋转运动。用两个电容开关决定工作台何时换向。当传感器 A 有输出信号时,主电动机停止反转,同时,接通其正转电路,从而使工作台向右运动;当传感器 B 有输出信号时,主电动机停止正转,同时,接通其反转电路,从而使工作台向左运动。这样,就实现了工作台的行程限位。

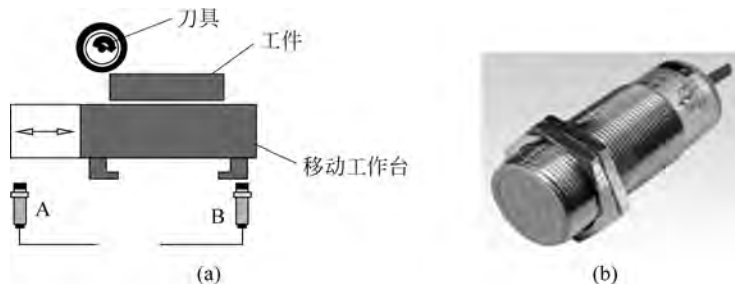


图 3-17 电容接近开关用于行程限位及其实物图